

УДК 661.74:669.14.046.554

А.А. Кулініч

**ФАЗОВИЙ СКЛАД, СТРУКТУРА І МЕХА-
НІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ АМгбл З
ДОМІШКАМИ ЗАЛІЗА І БЕРИЛІЮ****Вступ**

Ливарні сплави системи Al–Mg характеризуються високим рівнем корозійної стійкості, пластичності, в'язкості, добре зварюються. Вони використовуються в суднобудуванні та інших галузях для отримання деталей, які працюють у вологій атмосфері, в прісній і морській воді [1–3]. На сьогодні для виробництва цих сплавів використовується алюміній високої чистоти, що підвищує вартість їх виробництва. Використання високочистого алюмінію пов'язане з необхідністю мінімізувати в досліджуваних сплавах вміст шкідливих домішок заліза і кремнію, які знижують їх механічні властивості, особливо пластичність [1–3].

Типовий сплав даної системи АМгбл належить до сплавів із середнім вмістом магнію, він використовується як після лиття, так і після термічної обробки. В ньому, згідно з ДСТУ 2839–94, вміст домішок заліза не має перевищувати 0,2 %. Але, якщо використовувати для виробництва цього сплаву технічний алюміній, лом і відходи алюмінієвих сплавів з метою зниження собівартості його виробництва, то можливе підвищення вмісту в ньому домішок заліза.

Одним із засобів нейтралізації шкідливого впливу домішок заліза є мікролегування сплавів. Так, в ливарних алюмінієвих сплавах при мікролегуванні їх берилієм замість фази FeAl_3 може утворюватись більш компактна, глобулярна фаза $\text{Al}_4\text{Fe}_2\text{Be}_5$, яка менше знижує рівень механічних властивостей сплавів [4, 5]. Для встановлення можливості нейтралізації шкідливого впливу домішок заліза на механічні властивості ливарних сплавів системи Al–Mg мікролегуванням берилію потрібно встановити вплив даної домішки на їх фазовий склад, структуру та механічні властивості.

Постановка задачі

У даній статті досліджується вплив берилію на фазовий склад, структуру і механічні

властивості ливарного сплаву АМгбл з підвищеним вмістом заліза з метою виявлення можливостей підвищення вмісту його в ливарних сплавах системи Al–Mg без істотного зниження рівня їх механічних властивостей.

Отже, мета статті – дослідження впливу домішок берилію вмістом до 0,5 % на фазовий склад, структуру і рівень механічних властивостей ливарного сплаву АМгбл із вмістом домішок заліза до 1,0 % після лиття в кокіль.

Методика досліджень

Об'єктом дослідження в статті є ливарний сплав АМгбл. Хімічний склад його змінювався в таких межах: $\text{Mg} = 6\text{--}7\%$, $\text{Zr} = 0,15$, $\text{Be} = 0,05$, $\text{Ti} = 0,1\%$. Вміст домішок у сплаві: $\text{Mn} \leq 0,05\%$, $\text{Cu} \leq 0,03$, $\text{Zn} \leq 0,06$, $\text{Si} \leq 0,04\%$. Додатково вводились домішки заліза з використанням подвійної алюмінієвої лігатури вмістом до 1 %.

Плавки проводились в лабораторній печі опору в графітошамотному тиглі. Використовувались такі шихтові матеріали: алюміній марки А99, лігатури Al–Mg, Al–Zr, Al–Be, Al–Ti, Al–Fe. У тиглі розплавлялись алюміній і лігатура Al–Be. Після їх розплавлення, при температурі 690 °C вводились лігатури Al–Zr, Al–Ti, Al–Fe. Після розплавлення шихтових матеріалів і перемішування розплаву вводилась лігатура Al–Mg. При температурі 700 °C проводилось рафінування розплаву флюсом у кількості 2 % від маси сплаву. Склад флюсу: 85 % карналіту ($\text{MgCl}_2\text{--KCl}$) і 15 % фтористого кальцію. Далі розплав розливався в металеву виливницю.

На отриманих стандартних зразках діаметром 10 мм визначались механічні властивості досліджуваних сплавів (тимчасовий опір розриву, межа плинності, відносне подовження). Випробування механічних властивостей проводились на розривній машині TIRA–TEST за стандартними методиками.

Середні квадратичні відхилення значень механічних властивостей знаходились у межах $\sigma_B - \pm 20$ МПа, $\sigma_{0,2} - \pm 10$ МПа, $\delta - \pm 15\%$.

Мікрорентгеноспектральний аналіз проводився з використанням растрового електронного мікроскопа РЕММА–101А. Хімічний аналіз зразків досліджуваних сплавів робився при використанні методу оптичної спектроскопії випаровуючим розрядом. Якісний і кількісний металографічний аналіз виконувався на мікроскопі NEOFOT–31. Рентгенографічне дослідження відбувалось в Cu-характеристичному ви-

промінюванні із застосуванням дифрактометра ДРОН-413.

Експериментальна частина

На першому етапі досліджень було встановлено вплив домішок заліза вмістом до 1 % на фазовий склад, структуру та механічні властивості сплаву АМгбл після лиття в кокіль. За даними рентгенофазового, рентгеноспектрального і термічного аналізів, було виявлено, що фазовий склад досліджуваного сплаву після лиття в кокіль складається з алюмінієвого твердого розчину (α_{Al}), фази $\beta(Al_3Mg_2)$ і $FeAl_3$.

Хімічний склад фаз, які утворюються в досліджуваному сплаві при кристалізації, наведено в табл. 1, а мікроструктуру сплаву АМгбл після лиття в кокіль – на рис. 1.

Таблиця 1. Хімічний склад надлишкових фаз у сплаві АМгбл

Формула фази	Fe	Mg
(Al_3Mg_2)	—	35–38
$FeAl_3$	38–40	—

Примітка – інше алюміній.

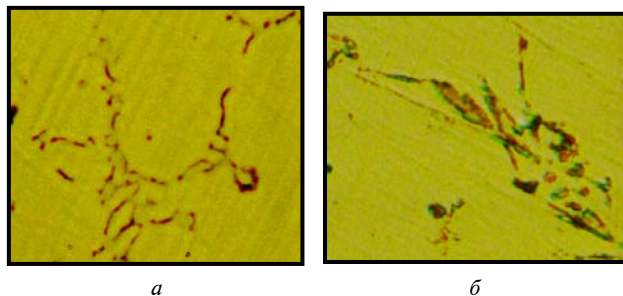


Рис. 1. Мікроструктура сплаву АМгбл з домішками заліза після лиття в кокіль: а, б – $\times 450$

Структура сплаву АМгбл після лиття в кокіль складається із зерен алюмінієвого твердого розчину і виділень частинок фази $\beta(Al_3Mg_2)$, які розміщуються по границях дендритних комірок (рис. 1, а). В структурі є також частинки фази $FeAl_3$, які мають голчасту форму і знаходяться всередині зерен або перетинають їх межі (рис. 1, б). Залежність механічних властивостей сплаву АМгбл від вмісту домішок заліза після лиття в кокіль наведено на рис. 2. З рисунка видно, що при збільшенні вмісту заліза в даному сплаві з 0,05 до 1 % спостерігається зниження рівня його механічних властивостей, особливо пластичнос-

ті. Так, при вмісті заліза 1 % значення тимчасового опору розриву сплаву АМгбл знижується на 26 МПа (з 251 до 225 МПа), а значення відносного видовження зменшуються більш ніж у два рази (з 12,5 до 5,8 %).

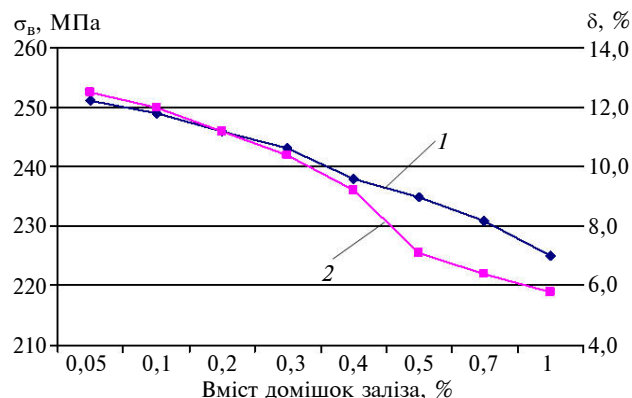


Рис. 2. Вплив домішок заліза на механічні властивості сплаву АМгбл після лиття в кокіль: 1 – σ_B , МПа; 2 – δ , %

Встановлено, що при збільшенні у сплаві АМгбл вмісту заліза з 0,05 до 1 % зростає кількість частинок фази $FeAl_3$, які перетинають межі зерен, збільшуються поздовжні і поперечні розміри їх, що істотно впливає на зниження рівня механічних властивостей даного сплаву.

На другому етапі досліджень встановлено вплив домішок берилію вмістом до 0,5 % на фазовий склад, структуру та механічні властивості сплаву АМгбл з домішками заліза вмістом до 1 % після лиття в кокіль. Кремній в досліджуваному сплаві не перевищував 0,03 % від маси сплаву.

За даними мікрорентгеноспектрального аналізу, хімічний склад і формула залізовмісних фаз, які утворюються у сплаві АМгбл при введенні в нього заліза до 1 % і берилію від 0 до 0,5 %, показані в табл. 2. Залежність виду залізовмісних фаз від вмісту заліза і берилію у сплаві АМгбл наведено в табл. 3. З даних табл. 2 і 3 видно, що в досліджуваному сплаві при вмісті заліза до 1 % і берилію від 0 до 0,5 % від маси сплаву можливе утворення трьох залізовмісних фаз: $FeAl_3$, $Al_4Fe_2Be_5$, $AlFeBe_4$.

Таблиця 2. Формула і хімічний склад залізовмісних фаз у сплаві АМгбл з домішками заліза та берилію

Хімічний склад фази, % за масою			Формула фази
Al	Fe	Be	
60–62	38–40	—	$FeAl_3$
39–42	39–41	19–20	$Al_4Fe_2Be_5$
23–28	39–42	33–35	$AlFeBe_4$

Таблиця 3. Вплив вмісту заліза та берилію на вид залізовмісних фаз у сплаві АМгбл

Вміст домішок у сплаві, % за масою		Формула залізовмісної фази
Fe	Be	
0,5	—	FeAl ₃
0,75	—	FeAl ₃
1	—	FeAl ₃
0,5	0,2	FeAl ₃ , Al ₄ Fe ₂ Be ₅
0,5	0,3	Al ₄ Fe ₂ Be ₅
0,5	0,4	Al ₄ Fe ₂ Be ₅ , AlFeBe ₄
0,5	0,5	AlFeBe ₄
0,75	0,2	FeAl ₃ , Al ₄ Fe ₂ Be ₅
0,75	0,3	FeAl ₃ , Al ₄ Fe ₂ Be ₅
0,75	0,4	Al ₄ Fe ₂ Be ₅
0,75	0,5	Al ₄ Fe ₂ Be ₅ , AlFeBe ₄
1	0,2	FeAl ₃ , Al ₄ Fe ₂ Be ₅
1	0,3	FeAl ₃ , Al ₄ Fe ₂ Be ₅
1	0,4	FeAl ₃ , Al ₄ Fe ₂ Be ₅
1	0,5	Al ₄ Fe ₂ Be ₅

Встановлено вплив співвідношення вмісту заліза і берилію на фазовий склад і структуру досліджуваного сплаву.

1. У сплаві АМгбл, при відсутності берилію, утворюється лише одна залізовмісна фаза — FeAl₃. Фазовий склад даного сплаву після лиття — α -твердий розчин магнію в алюмінії, фази β (Al₃Mg₂) і FeAl₃.

2. Якщо в досліджуваному сплаві вміст заліза і берилію знаходиться в межах $0,1\% < Fe < 0,6\%$, $0,05\% < Be < 0,3\%$ і виконується співвідношення $Be/Fe \leq 0,5$, крім фази FeAl₃ (рис. 3, а), то утворюється нова фаза — Al₄Fe₂Be₅ з невеликими розмірами і компактною морфологією (рис. 3, б).

3. При вмісті заліза і берилію в межах $0,6\% \leq Fe \leq 1\%$ і $0,3\% \leq Be \leq 0,5\%$ та при співвідношенні $Be/Fe \leq 0,5$ утворюються такі ж самі фази FeAl₃ і Al₄Fe₂Be₅, але розміри фази Al₄Fe₂Be₅ істотно збільшуються (рис. 3, в). Враховуючи зміну морфології даної фази, потрібно вміст заліза в досліджуваному сплаві обмежувати.

4. Встановлено, що для досліджуваного сплаву з $Fe \leq 1$ і $Be \leq 0,5\%$ при виконанні умови $Be/Fe \geq 0,5$ виникає нова фаза — AlFeBe₄, яка характеризується великими розмірами і розгалуженою морфологією (рис. 3, г). Згідно з даними, наведеними в табл. 4, поява цієї фази знижує комплекс механічних властивостей.

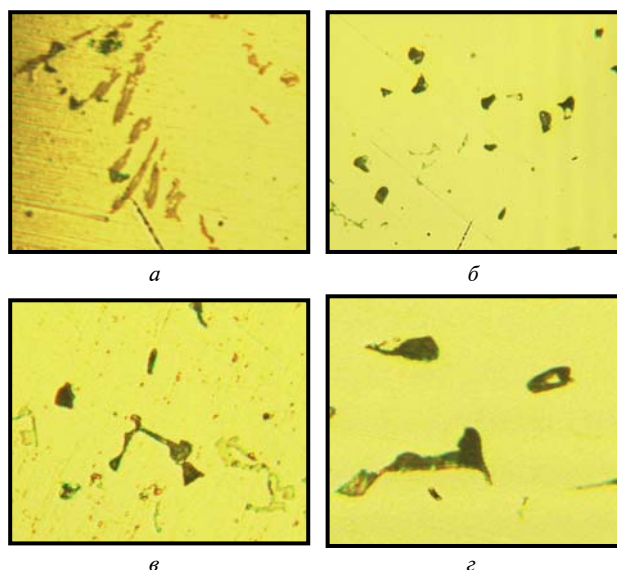


Рис. 3. Структура сплаву АМгбл з домішками заліза і берилію: а — 0,7 % Fe; б — 0,5 % Fe і 0,25 % Be; в — 0,8 % Fe і 0,3 % Be; г — 0,8 % Fe і 0,5 % Be

Таблиця 4. Вплив заліза і берилію на механічні властивості сплаву АМгбл після лиття в кокіль

Вміст домішок у сплаві, % за масою		Механічні властивості		Вид залізовмісної фази
Fe	Be	σ_B , МПа	δ , %	
0	0	254	12,7	FeAl ₃
0,5	0	235	7,2	FeAl ₃
0,8	0	230	6,2	FeAl ₃
1	0	225	5,8	FeAl ₃
1	0,2	229	7,5	FeAl ₃ , Al ₄ Fe ₂ Be ₅
0,8	0,4	236	8,3	Al ₄ Fe ₂ Be ₅
0,5	0,25	245	10,6	Al ₄ Fe ₂ Be ₅
0,5	0,4	239	9,7	Al ₄ Fe ₂ Be ₅ , AlFeBe ₄

5. Оптимальний вміст заліза і берилію, який забезпечує максимальний рівень механічних властивостей досліджуваного сплаву: $Fe = 0,5\%$, $Be = 0,25\%$ (див. табл. 4). Оптимальне співвідношення заліза і берилію у сплаві: $Be/Fe \approx 0,4-0,5$. Структуру даного сплаву наведено на рис. 3, б.

Висновки

Нами встановлено вплив домішок берилію вмістом до 0,5 % на фазовий склад, структуру і рівень механічних властивостей ливарного сплаву АМгбл із вмістом домішок заліза до 1,0 % після лиття в кокіль. Залежно від вмісту берилію і співвідношення Be/Fe в досліджува-

ному сплаві можливе утворення трьох залізо-вмісних фаз: FeAl_3 , $\text{Al}_4\text{Fe}_2\text{Be}_5$ і AlFeBe_4 .

Оптимальний вміст заліза і берилію, який забезпечує максимальний рівень механічних властивостей досліджуваного сплаву: $\text{Fe} = 0,5\%$, $\text{Be} = 0,25\%$. Оптимальне співвідношення заліза і берилію у сплаві: $\text{Be}/\text{Fe} \approx 0,4\text{--}0,5$. При виконанні даних умов рівень механічних властивос-

тей сплаву АМгбл буде відповідати вимогам державного стандарту до даного сплаву.

Перспективність подальших досліджень в даному напрямку полягає в можливості встановлення впливу домішок берилію на фазовий склад, структуру і рівень механічних властивостей інших промислових ливарних сплавів системи Al–Mg.

А.А. Кулинич

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА АМгбл С ПРИМЕСЯМИ ЖЕЛЕЗА И БЕРИЛЛИЯ

Исследовано влияние примесей железа и бериллия на фазовый состав, структуру и механические свойства сплава АМгбл после литья в кокиль. Установлено оптимальное содержание железа и бериллия, которое обеспечивает максимальный уровень механических свойств исследуемого сплава, а также оптимальное соотношение железа и бериллия в сплаве, что соответствует требованиям государственного стандарта.

A.A. Kylinich

PHASE COMPOSITION, STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF АМГбл ALLOY WITH ADMIXTURES OF IRON AND BERYLLIUM

The paper studies the influence of admixtures of iron and beryllium on the phase composition, structure and mechanical properties of АМГбл alloy after casting. We determine the optimum content of iron and beryllium, which provides the maximal level of mechanical properties of the alloy under study. We also define the optimum correlation of iron and beryllium in an alloy that conform to requirements of the state standard.

1. Золотаревский В.С., Белов Н.А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. — М.: МИСИС, 2005. — 376 с.
2. Машиностроение. Энциклопедия. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. Т. II / Под общ. ред. И.Н. Фридляндера. — М.: Металлургия, 2001. — 880 с.
3. Постников Н.С. Коррозионностойкие алюминиевые сплавы. — М.: Металлургия, 1976. — 304 с.
4. Гаврилюк В.П., Рябініна О.О., Кулініч А.А., Доній О.М. Вплив берилію на фазово-структурний склад і меха-

- нічні властивості сплаву Al-6%Mg-2%Zn з підвищеним вмістом заліза // Наукові вісті НТУУ "КПІ". — 2006. — № 3. — С. 45–48.
5. Кулініч А.А., Гаврилюк В.П., Рябініна О.О., Доній О.М. Фазово-структурний склад і механічні властивості сплаву Al-6%Mg-2%Zn-0,5%Fe-0,5%Si з добавками берилію після різних режимів відпау // Там же. — 2007. — № 3. — С. 101–104.

Рекомендована Радою
інженерно-фізичного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
28 грудня 2010 року